第45卷 第6期
2022年11月

干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

Vol. 45 No. 6
Nov. 2022

末次冰盛期以来塔里木盆地绿洲演化研究进展与问题

孙爱军[1,2,3]， 赵 晖[2]， 刘 冰[2]， 汪克奇[2,3]，
晁 倩[2,3]， 史志林[4]， 陈发虎[1,5,6]

（1. 兰州大学资源环境学院/西部环境教育部重点实验室，甘肃 兰州 730000；2. 中国科学院西北生态环境资源研究院/沙漠与沙漠化重点实验室，甘肃 兰州 730000；3. 中国科学院大学，北京 100049；4. 兰州大学敦煌学研究所，甘肃 兰州 730000；5. 中国科学院青藏高原研究所青藏高原地球系统与资源环境国家重点实验室，北京 100101；6. 中国科学院青藏高原研究所古生态与人类适应团队，北京 100101）

摘 要：塔里木盆地绿洲是中亚干旱区历史时期和现代人类生产和生活的重要场所，也是古丝绸之路和现代丝绸之路经济带的重要节点。对此区域绿洲沉积记录进行研究，可以了解绿洲演化过程，从而进一步对绿洲演化的机制进行分析。由于塔里木盆地周边绿洲人类活动剧烈，导致连续完整的绿洲沉积记录较为缺乏；而且此区域环境变化敏感复杂，沉积记录存在'同期异相'等特性，限制了对绿洲演化过程和影响机制的探讨。因此，对塔里木盆地绿洲沉积物与绿洲演化过程研究进行系统总结非常必要。通过梳理目前对绿洲和绿洲沉积物的分类与定义，认为除了地貌与沉积相，还需结合表征绿洲沉积阶段的指标体系才能更好地厘清绿洲演化过程。筛选了记录塔里木盆地末次冰盛期以来的24篇绿洲沉积序列的文献，对文献中232个绿洲沉积发育年代和其中的120个河湖相沉积发育年代数据分别进行概率密度统计。总体来看，绿洲沉积与河湖相沉积发育年龄具有较好的一致性，暗示绿洲发育与盆地内部水文过程密切相关。同时，6 ka之前，绿洲发育概率密度与古里雅冰芯$\delta^{18}O$记录的温度具有相同变化趋势，盆地周边高山地区冰川融水可能是绿洲发育的主控因素；6 ka之后，绿洲发育与天山鹿角湾黄土-古土壤序列记录的湿度变化较为一致，绿洲发育可能主要响应于山地降水变化。进一步对塔里木盆地不同区域绿洲发育概率与古环境演化记录进行对比，发现不同区域绿洲发育与古环境记录存在着不一致性。在未来研究中，应该对塔里木盆地各区域大范围不连续的绿洲沉积进行集成研究，构建区域绿洲演化过程和年代框架，在此基础上对控制各区域绿洲发育的因素进行深入探讨。

关 键 词：末次冰盛期；绿洲演化；河湖相沉积；塔里木盆地

文章编号：1000－6060(2022)06－1761－12(1761～1772)

绿洲是干旱区和半干旱区荒漠背景条件下，一种具有稳定水源供给的具有较高生产力的非地带性地理和生态景观[1]。中亚干旱区是世界上重要的绿洲分布区和丝绸之路的核心区；穿行于我国河西走廊和新疆地区绿洲之中的丝绸之路是连接东西方文明的纽带[2-3]。长期以来，不同学者对丝路沿线的绿洲分别从沉积特征、年代学、生态学及环境演化等方面开展了大量的研究工作[4-6]。塔里木盆地绿洲是史前东西方文明交汇和文化交流的重要通道，也是历史时期丝绸之路的主要节点，此区域绿洲过去的时空演化深刻地影响了丝路文明的发展进程，绿洲的发育、演化与丝路文明的兴衰休戚相关[2,7]。同时，绿洲也是该区域历史时期和现代人类社会生产及生活的主要场所，是沙漠地区的绿色生命长廊和丝绸之路极其重要的生态屏障，关系到我国"绿色丝绸之路经济带"建设的实现[8]。

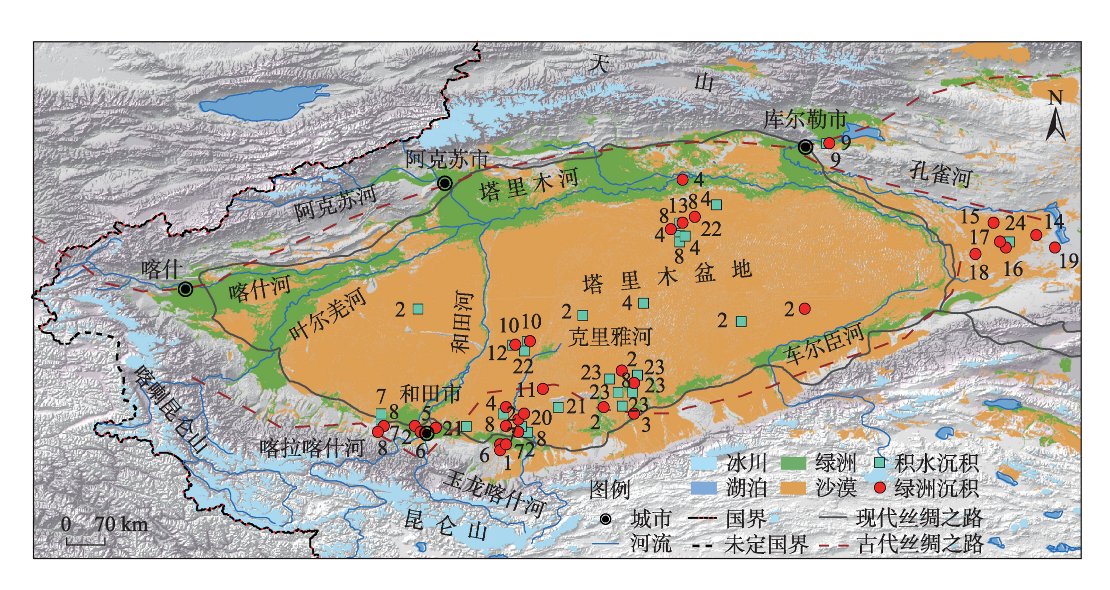
收稿日期：2022-03-16； **修订日期：**2022-04-12
基金项目：国家重点研发计划项目(2018YFA0606400)；第三次新疆综合科学考察项目(2021xjkk0302)资助
作者简介：孙爱军(1986-)，男，博士研究生，主要从事释光年代学和绿洲演化研究. E-mail: sunaj20@lzu.edu.cn
通讯作者：赵晖(1973-)，男，研究员，主要从事释光年代学和环境演化研究. E-mail: hzhao@lzb.ac.cn

绿洲演化是绿洲研究的核心问题，它包含了绿洲范围的扩张和萎缩以及绿洲内部景观的变化，研究绿洲的演化过程有助于正确理解干旱区绿洲化和荒漠化发生、发展机制，从而为巩固扩大绿洲、优化生态环境提供重要的理论支撑[9]。鉴于塔里木盆地绿洲演化的重要性，不同学者已开展了众多研究，主要集中于绿洲的沉积过程和影响绿洲发育的水文过程，认为绿洲的发育过程包括前绿洲沉积阶段和绿洲发育阶段[4]。由于塔里木盆地降水稀少，地表径流的水文过程是控制塔里木盆地绿洲发育的关键因素[10]。研究者发现，在塔里木盆地广泛发育了河湖相沉积，并且有研究认为其属于前绿洲阶段[4]，绿洲沉积多发育在河湖相沉积之上，这一结论也被近期地表过程研究所证实[11]。此外，对河湖相沉积过程和绿洲演化过程进行比对研究，可以更好地理解绿洲演化的过程及其机制[10]。目前，塔里木盆地绿洲演化研究角度主要包括绿洲发育的年龄[10]、绿洲演化过程[4,11]、绿洲演化与气候变化的关系等[12]。本文主要梳理综述了已发表的文献，对塔里木盆地绿洲的主要类型进行总结，依据沉积过程和沉积特征对绿洲沉积物进行分类。同时，按照绿洲和河湖相沉积剖面分布特征，对塔里木盆地末次冰盛期以来绿洲沉积和河湖相沉积时空分布进行划分和总结，对二者发育的年代进行概率密度统计，并与前人研究的古里雅冰芯δ[18]O记录的温度变化和天山鹿角湾黄土-古土壤序列记录的湿度变化进行对比，尝试探讨塔里木盆地绿洲发育的控制因素。进一步对塔里木盆地不同区域的绿洲发育年代进行讨论，并与塔里木盆地及周边古环境演化记录进行对比，初步探讨了绿洲演化与古环境变化之间的关系。

1 区域概况与研究资料

塔里木盆地（37°~42°N，75°~95°E）位于中国西北干旱区，北部为天山山脉、西部为帕米尔高原、南部为昆仑山山脉。盆地东西长达1400 km，南北最宽距离为520 km，面积约56×10^4 km^2，是中国最大的内陆盆地[13]。盆地现今地势由西南向东北倾斜，盆地内部平均海拔900~1000 m，周围高山和高原平均海拔4000~5000 m，盆地地貌格局具有环带分布的特征，由外围向中心依次为山地、丘陵、山前冲积扇、冲积平原、沙漠[14]，在盆地不同区域，环境存在着巨大差异。盆地主体被中国最大的沙漠塔克拉玛干沙漠覆盖（面积33.7×10^4 km^2），周围山地发育的河流呈向心状汇入盆地，冲积扇前缘和沿河发育的绿洲镶嵌分布在盆地的周边地带（图1）。在塔克拉玛干沙漠内部的丘间地，广泛分布着河湖相沉积[10-11]。塔里木盆地年平均气温11 ℃，年降水量介于25~40 mm，年潜在蒸发量2100~3400 mm，是我国最干旱的地区之一，属于典型的大陆性气候[13]。

为了更好地理解塔里木盆地绿洲演化过程，首



注：该图基于国家数据库下载的审图号为GS(2019)1822号的标准地图制作，底图边界无修改。图中数字为下文表1中文献序号。

图1 塔里木盆地绿洲沉积剖面和河湖相沉积剖面分布

Fig. 1 Locations of the oasis and fluvial-lacustrine deposits profiles in Tarim Basin

先应理解绿洲和绿洲沉积的概念及分类。本文整理了6篇被引超过50次对塔里木盆地绿洲及绿洲沉积进行定义的文献[1,12,15-18]，3篇对塔里木盆地绿洲进行分类的文献[19-21]，5篇涉及塔里木盆地不同绿洲沉积物划分和分类的成果[11,22-25]。河湖相沉积的出现代表了此区域曾经有地表径流或较长时期的积水，过去研究者将河湖相沉积归类于绿洲沉积或绿洲演化序列中的前绿洲沉积阶段[4]。最近关于塔里木盆地地表过程研究中，表征绿洲沉积的指标体系也指示河湖相沉积属于前绿洲沉积阶段[11]。在本文中，我们仍将河湖相沉积依其原文献归类于绿洲沉积。同时，为了更好地探讨绿洲演化与塔里木盆地水文过程的关系，对河湖相沉积的发育年代进行了单独统计。根据以下2个标准进行筛选：首先，由于28 ka之前绿洲沉积记录较为零星，本文只统计28 ka以来的记录以便总结其规律性；其次，记录尽量能涵盖较长时间尺度，有较多的年代控制点，年代可靠。本文梳理了关于塔里木盆地不同区域绿洲演化的24篇文献，包括绿洲发育年代264个，其中 ^{14}C 年代220个，光释光(OSL)年代32个，热释光(TL)年代12个；这些绿洲发育年代中包括河湖相沉积年代120个，其中 ^{14}C 年代84个，OSL年代28个，TL年代8个。为保持数据一致性，对 ^{14}C 年代进行了日历年代校正，具体情况在表1列出。

2 研究进展

2.1 塔里木盆地绿洲、绿洲沉积的分类

过去，不同学者从经济学[15]、景观生态学[12,17]和

表1 记录塔里木盆地末次冰盛期以来绿洲演化过程文献

Tab. 1 Record documents of the oases evolution process since the Last Glacial Maximum in Tarim Basin

文献序号	剖面及钻孔名称	位置	时间跨度	测年手段	绿洲沉积年代个数	表征积水沉积年代个数	参考文献
1	达玛沟剖面	策勒县城东约13 km	4 ka以来	^{14}C	4	–	钟巍等[22]
2	–	塔里木盆地南缘及腹地	23 ka以来	^{14}C/TL/OSL	24	17	李保生等[23]
3	Niya River	38°08′N,82°46′E	4 ka以来	^{14}C	6	–	Zhong等[24]
4	–	塔里木盆地南缘及北部	15 ka以来	^{14}C	34	8	冯起等[25]
5	塔格勒剖面	策勒县塔格勒	1 ka以来	^{14}C	2	–	钟巍等[26]
6	达玛沟剖面 约特干遗址剖面	策勒县达玛沟 和田市约特干遗址	13 ka以来	^{14}C	7	–	文启忠等[27]
7	–	和田–于田	14 ka以来	^{14}C	7	1	Li等[28]
8	–	克里雅河流域	28 ka以来	^{14}C/OSL	34	31	Shu等[29]
9	博斯腾湖二级湖滨阶地	41°56′N,86°40′E	12 ka以来	^{14}C	6	2	钟巍等[30]
10	克里雅河西北剖面	38°58′N,81°59′E	20 ka以来	^{14}C	13	8	靳鹤龄等[31]
11	–	克里雅河流域	2 ka以来	^{14}C	5	–	Yang[32]
12	圆沙古城	克里雅河尾闾	3 ka以来	^{14}C/OSL	19	5	张峰等[33]
13	–	塔里木河流域	3 ka以来	^{14}C	8	5	秦作栋等[34]
14	–	罗布泊地区	2 ka以来	^{14}C	17	–	Lü等[35]
15	YKD0301	40°12′N,90°17′E	28 ka以来	^{14}C/OSL	21	–	Zhang等[36]
16	L06-6	40°30′N,90°92′E	10 ka以来	^{14}C	4	–	钟骏平等[37]
17	L07-10	40°20′N,90°59′E	12 ka以来	^{14}C	4	–	华玉山等[38]
18	–	40°27′N,90°20′E	11 ka以来	^{14}C	3	–	Ma等[39]
19	ZKD0017	罗布泊地区	17 ka以来	^{14}C	3	–	刘成林等[40]
20	KY1、KY2、TK3、TK6	克里雅河流域	17 ka以来	^{14}C	12	12	周兴佳等[41]
21	–	克里雅河流域	3 ka以来	OSL	4	4	Yang等[42]
22	–	38°42′~40°29′N 81°55′~84°18′E	26 ka以来	^{14}C	8	8	Elisabeth等[43]
23	–	塔里木盆地腹地	21 ka以来	OSL	15	15	杨小平等[44]
24	Pagoda section	楼兰古城	11 ka以来	OSL	4	4	Qin等[45]

注：–表示剖面名称、具体采样位置没有在原文中给出，或没有表征河湖相沉积的年代。

地理学[18,21]等不同学科角度来理解和定义绿洲。其争议点主要在于对绿洲分布范围的划分和绿洲内部有无人类活动2个方面,有观点认为,绿洲是指有一定规模的生命群体居住的与周围环境完全不同的地方,并不局限于干旱区才发育绿洲[1];也有观点认为,只有人类进行社会经济活动的区域才能称为绿洲[21]。我们认为以下几点是理解干旱区绿洲的关键:首先,绿洲是镶嵌在荒漠区的一种高生产力的特殊地域性景观,绿洲内部可能存在小范围斑块状荒漠[12];其次,水是绿洲存在的基础,在降水量稀少的干旱区,绿洲需要具有稳定的水源供给;最后,绿洲是一种中小尺度的,分布具有非地带性的地理和生态景观[1]。研究者按照绿洲的形成历史[19]、所在的地貌部位及人类活动的影响程度对塔里木盆地绿洲类型进行了划分[20-21],在表2列出。

绿洲沉积是指在绿洲生物发育、演化的环境中无机物和有机物在地表和近地表层的沉积或沉淀作用[4]。但是,目前对于塔里木盆地绿洲沉积的划分还未取得统一认识,特别是冲洪积物和河湖相沉积究竟是不是绿洲沉积值得进一步讨论[11]。塔里木盆地独特的地貌和水系格局决定了绿洲呈斑块状沿山前冲积扇和河流分布,加之人类活动的影响,绿洲沉积在时空上具有不连续性。对不同文献记录的塔里木盆地绿洲沉积主要类型进行总结,依据沉积过程和沉积特征的差异进行分类,具体的沉积过程、沉积特征和沉积物类型在表3列出。

过去,研究者主要根据沉积相和沉积特征对盆地绿洲沉积进行辨别,但是在剖面中很难区分出具体的绿洲沉积物类型。最近,Liu等[11]对盆地大范围的表土沉积进行研究,建立了辨别盆地现代绿洲沉积的指标体系,发现相对于沙漠沉积,绿洲沉积粒度较细,土壤养分较高,淋溶系数较低。代表前绿洲沉积阶段的河流沉积物虽有较细的粒度分布(70~90 μm),其全有机碳(TOC)和全氮(TN)含量0.19 $g\cdot kg^{-1}$和0.24 $g\cdot kg^{-1}$远低于代表绿洲沉积阶段的湿地TOC含量(0.83 $g\cdot kg^{-1}$)和TN含量(0.30 $g\cdot kg^{-1}$)。综合运用这一指标体系可以区分出前绿洲沉积、绿洲沉积和沙漠沉积。后续可将其应用到绿洲沉积

表2 塔里木盆地绿洲划分及主要类型

Tab. 2 Division and main types of oasis in Tarim Basin

划分标准	主要类型	典型特征
绿洲形成历史和废弃年代[19]	古绿洲	是指历史上曾经存在过,由于自然条件的改变或人类活动影响而放弃,主要类型为沙漠腹地的遗址
	旧绿洲	开发历史悠久,至今还在利用的绿洲,多分布在山前冲积扇和冲积平原上段,属于农牧交错带,如和田、于田绿洲等
	新绿洲	一般指20世纪50年代后新开垦的绿洲,多分布在旧绿洲外围和边缘,是现在主要的农业区,如绿洲外围开垦的农田、果园等
绿洲所处的地貌部位[20-21]	扇形地绿洲	位于河流出山后形成冲洪积扇中下部,一般距河流出山口不远,水土组合较好,是重要的农业基地,如和田绿洲等
	沿河绿洲	多位于水量较大河流的低阶地和河岸地带,一般呈长条状,地势平坦,引水方便,水土条件较好,宜于垦殖和村镇建设,如河流沿岸绿洲
	干三角洲绿洲	主要分布在较大河流的尾闾区,地势平坦,引水方便,但水源不稳定,受河流水量及河道变迁影响大,如现在克里亚河尾闾的达里雅博依绿洲
人类活动影响程度[20-21]	自然绿洲	自然条件下形成的,人类活动对其无影响或影响微弱,以自然景观为主,生产力较低,如克里雅河沿岸的胡杨林
	人工绿洲	在人类的开发经营起着决定性的作用下形成的,原有的自然生态系统已发生彻底改变,生产力比天然绿洲高得多,如围绕塔里木盆地的主要城镇

表3 塔里木盆地绿洲沉积的主要类型

Tab. 3 Main types of oasis sediments in Tarim Basin

沉积过程和沉积特征	主要沉积物类型
沉积物经历了水的搬运和沉积过程[11,23,25]	冲洪积沙土、冰积泥砾、砾石层、泛滥沉积、湖相沉积、冰楔、冲积物
经历了一定的土壤化过程[23]	亚黏土、绿洲土、腐殖土、粉砂质古土壤
有机质含量丰富或含植物残体[11,22,24]	生草层、炭化层、弱碳化红柳叶层、枯枝落叶层、红柳残体层
含有水生软体化石[23]	螺壳、水生蜗牛等

序列中，对剖面中的绿洲沉积物和绿洲发育阶段进行划分和研究。

2.2 塔里木盆地绿洲时空演化特征及可能控制因素

通过对前人研究的塔里木盆地绿洲沉积剖面进行梳理，按照剖面分布地域的不同，将图1中绿洲剖面分布位置划分为塔里木盆地南部、塔里木盆地北部、塔里木盆地腹地、罗布泊地区。对不同区域绿洲沉积和其中的河湖相沉积按照分布区域和发育年龄进行总结(图2)，发现绿洲沉积的发育在盆地不同区域存在差异性，具体可划分为3个阶段(图2a)：28~16 ka，绿洲沉积记录较少，在罗布泊地区钻孔中可见，在其他区域零星发育；河湖相沉积在塔里木盆地腹地较为发育，在塔里木盆地南部和罗布泊地区发育较为零星。16~6 ka，绿洲和河湖相沉积在塔里木盆地广泛发育，在不同区域都有较多的记录。~6 ka以来，绿洲沉积在塔里木盆地不同区域都广泛发育，而河湖相沉积主要发育于塔里木盆地北部、腹地和罗布泊地区。

为了进一步对绿洲、河湖相沉积发育的规律进行总结，本文对二者发育的年代运用概率密度法进行分析，该方法可以直观表达大量年代数据(包含年代误差)的分布特征[46]，清晰呈现年代数据所指示的地质事件集中发生的时间区间[47]。由于同一考古点中年代往往特别集中，会导致与其他剖面比较时出现偏差；本文对表1文献12和14考古点中年龄相差不超过0.4 ka的年代数据放入同一年代箱中计算其平均值，做为一个年龄数据进行统计，有效地降低了上述影响[48]。最后整理出232个绿洲沉积和其中的120个河湖相沉积发育年代，以0.4 ka为组距进行分组，依据Venkatesan和Ramesh提供的算法在Matlab程序中进行运算[46]，生成塔里木盆地绿洲(图2b)、河湖相沉积(图2c)发育概率密度曲线。发

注：X_{ARM}/SIRM为非滞后剩磁/饱和等温剩磁；阴影表示不同阶段绿洲发育情况，蓝色为河湖相沉积发育年代。

图2　塔里木盆地绿洲、河湖相沉积年代概率密度及周边山地温度和湿度变化特征

Fig. 2　Probability density of oasis and fluvial-lacustrine deposits ages and variation characteristics of temperature and humidity around Tarim Basin

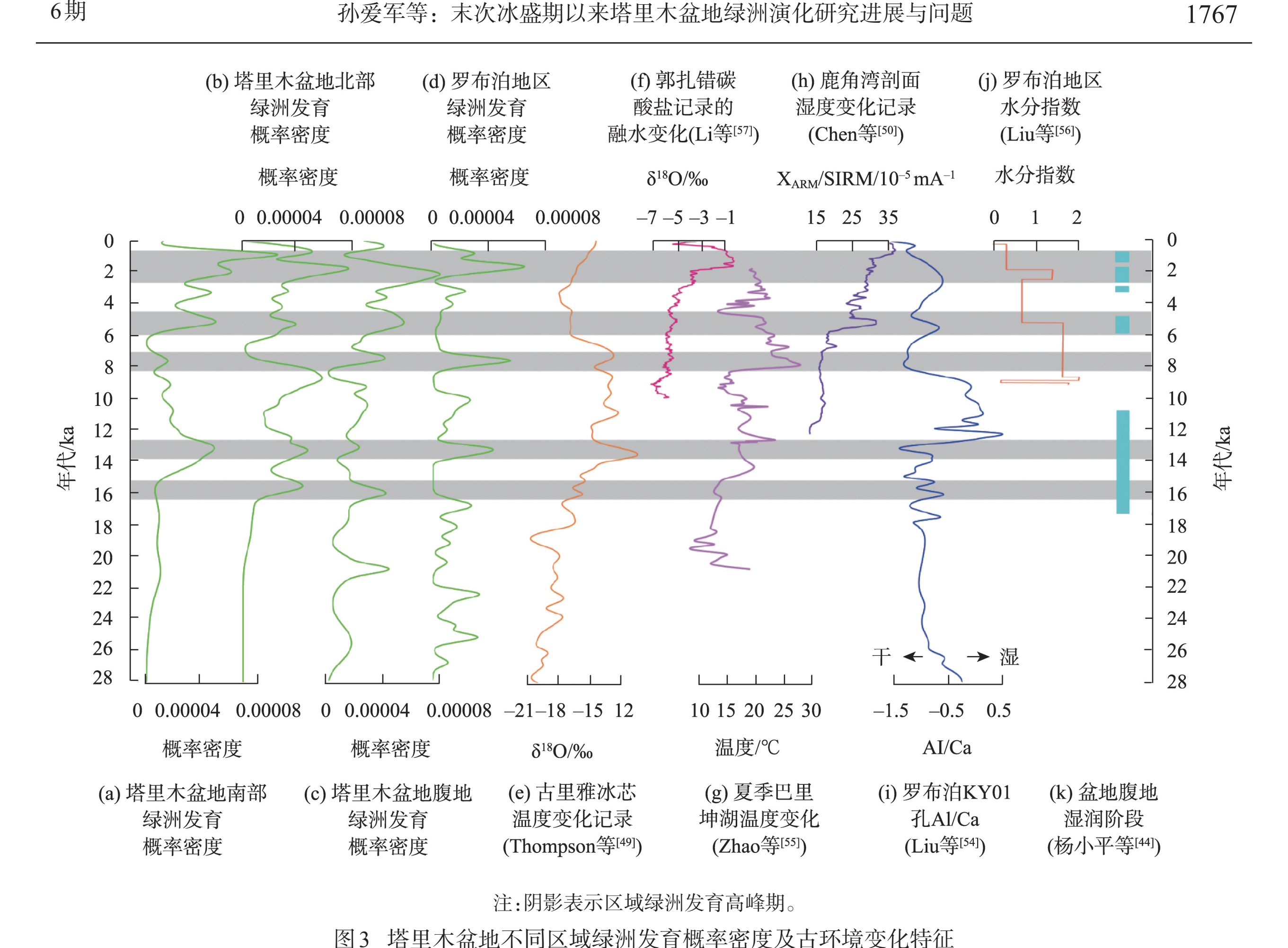
现绿洲、河湖相沉积发育的概率具有较为一致的变化趋势，即在盆地河湖相沉积发育概率密度高的时期，盆地绿洲沉积发育概率密度也较高。这就说明绿洲沉积与河湖相沉积的发育时间具有较好的一致性，绿洲发育与盆地内部水文过程密切相关。

过去研究表明，塔里木盆地内部降水量常年不足50 mm，潜在蒸发量达3000 mm[18]，而盆地周围山区降水量为100~400 mm[13]，研究者普遍认为控制塔里木盆地绿洲发育的主要因素是周边山地降水或冰雪融水[29,32,43]。古里雅冰芯$\delta^{18}O$曲线是反应昆仑山区温度变化的良好记录（图2d）[49]，Chen等[50]对天山鹿角湾黄土-古土壤序列磁学指标反应的全新世湿度变化进行了研究（图2e）。把绿洲沉积发育概率密度曲线与二者进行对比，发现在6 ka之前，绿洲沉积发育概率随着古里雅冰芯$\delta^{18}O$记录波动变化，即古里雅冰芯$\delta^{18}O$记录的温度高值阶段，绿洲沉积发育概率也出现了高峰；特别是在20 ka、13 ka、10 ka和7.5 ka 4个温度较高阶段出现了绿洲沉积发育概率同步增大的情况，这就暗示了在6 ka之前，盆地绿洲发育可能与高原和山区冰雪融水密切相关。在6 ka之后，古里雅冰芯$\delta^{18}O$记录的温度波动降低，天山鹿角湾黄土-古土壤序列磁学指标显示湿度增加，绿洲发育的3个峰值（5 ka、2 ka和1 ka）与鹿角湾剖面记录的3个湿度突然增加的阶段相对应。中晚全新世随着冬、夏季太阳辐射强度的显著增强，中高纬度太阳辐射梯度增加，西风环流持续增强[51]；与此同时，高纬度洋面温度升高使水汽蒸发量增加[52]。较强的西风携带充沛的水汽到达新疆地区，为该地区带来更多的山地降水，而山地降水的增加促进了盆地绿洲发育[53]。因此，中晚全新世控制盆地绿洲发育主要是山地降水。

2.3 塔里木盆地不同区域绿洲演化与环境变化的关系

Shu等[29]通过对克里雅河流域绿洲发育年代的研究，发现塔里木盆地南部30~12 ka时段较湿润时期与东亚季风增强阶段较为一致。Yang等[42]通过对塔里木盆地腹地河湖相序列研究表明盆地内部存在明显的干湿变化，积水沉积主要发育于5~2 ka，与西风区湿度变化较为一致[44]。罗布泊地区钻孔资料揭示晚更新世以来，此区域在千年尺度上存在明显的干湿变化[54]。由于塔里木盆地非常广袤，不同区域环境与水文状况存在着巨大差异[13,44]，有必要分区域讨论绿洲演化与气候/环境变化的关系，依据图2中对塔里木盆地绿洲沉积分布地域的划分，将每个区域绿洲发育的年代进行概率密度统计（图3中绿色曲线），并与盆地及周边分辨率较高的古环境演化记录进行对比，探讨不同区域绿洲演化与古环境变化之间的关系。

分区域来看，塔里木盆地不同区域绿洲发育虽然存在一定差异性，但是在许多细节上具有共同性（图3阴影）。28~16 ka期间，塔里木盆地腹地和罗布泊地区出现了绿洲发育高峰期，而在盆地南部和盆地北部绿洲发育都不明显。16 ka左右，罗布泊地区、盆地腹地和盆地北部出现一个绿洲发育期，盆地南部地区绿洲发育不显著。但是，塔里木盆地4个典型区域绿洲在13 ka、7.5 ka、4.5 ka几乎同时发育，只是在7.5 ka绿洲发育阶段，塔里木盆地北部绿洲发育高峰期出现在8.5 ka。晚全新世（特别是2~1 ka），盆地各区域同时广泛发育绿洲。综合来看，13 ka以来盆地不同区域绿洲发育的主要时间大体是一致的。通过与塔里木盆地及周边主要的古环境记录对比来看，16 ka和13 ka左右绿洲的发育与盆地腹地出现湿润阶段和古里雅冰芯$\delta^{18}O$记录的温度波动升高较一致[44,49]。但13 ka罗布泊钻孔Al/Ca显示这一时期比较干旱[54]，巴里坤湖相沉积记录的温度较低[55]，说明这2个时期绿洲的发育可能与山区温度波动升高带来的冰雪融水有关。7.5 ka和4.5 ka绿洲的发育与罗布泊地区水分指数和巴里坤湖相沉积记录的温度高值阶段对应[55-56]，但7.5 ka古里雅冰芯$\delta^{18}O$记录的温度较高[49]，绿洲发育可能主要与温度有关；而4.5 ka鹿角湾剖面磁学指标反应的湿度增加[50]，巴里坤湖相沉积记录的温度也较高[55]，绿洲发育可能与山区湿度的增加和盆地温度升高都有关联。2~1 ka绿洲的发育与天山鹿角湾剖面记录的湿度[50]、盆地腹地湿润阶段和罗布泊湿度高值阶段一致[44,54]，但此阶段郭扎错$\delta^{18}O$记录的冰川融水量降低[57]，绿洲发育可能同时与山区和盆地湿度增加相关。总体来说，塔里木盆地4个区域绿洲不同时段的发育即有同步性又存在差异性。在4个区域内部，目前高分辨率的环境变化记录较少，并且环境记录之间也存在着不一致性，主要是由于环境记录的载体、代用指标和剖面地理位置不同造成



注:阴影表示区域绿洲发育高峰期。

图3　塔里木盆地不同区域绿洲发育概率密度及古环境变化特征

Fig. 3　Probability density of oasis evolution and paleo-environment variation in different regions of Tarim Basin

的[44,56]。从区域绿洲发育与环境变化的关系来说,绿洲发育主要响应于湿度还是温度的变化仍不清晰,绿洲发育受控于周围山区还是盆地内部环境变化也有待于进一步研究。

塔里木盆地绿洲是连接河西走廊和中亚地区的重要通道,绿洲演化、人类迁徙和丝路变迁之间具有密切联系[2,58]。根据前文对塔里木盆地绿洲发育年代的总结,结合最新关于盆地遗址 ^{14}C 测年结果[58],5 ka左右盆地人类活动开始加强,这与绿洲发育的高峰值相对应,暗示了绿洲发育为人类活动提供了基础。过去对克里雅河主要遗址研究表明,从4 ka开始,遗址随着克里雅河绿洲的退缩不断南移[59];对尼雅遗址和罗布泊遗址的研究表明,人类活动与绿洲演化和水文过程密切相关[44,60]。汉代以前大月氏、乌孙、匈奴的西迁和塞人的南下,以及后来西域36国的发展与消亡无不与绿洲的繁荣和衰退密切关联[61],2 ka和1 ka绿洲发育的2个高峰期也为丝绸之路的开辟和繁盛提供了基础。

3　主要问题及展望

综上所述,不同学者对塔里木盆地绿洲演化进行了诸多研究,并取得了重要的进展,这为我们认识盆地绿洲演化过程,理解绿洲演化的机制,以及探讨绿洲演化与气候变化的关系提供了重要的资料。但是,随着对亚洲中部干旱区环境演化和丝路文明变迁研究的进一步深入[2,58],作为丝绸之路的主要通道和节点,塔里木盆地绿洲演化研究显得尤为重要,进一步研究绿洲时空演化特征及其驱动机制,对于认识绿洲演化与“丝路”变迁的关系意义重大。通过对塔里木盆地绿洲演化资料的梳理和总结,目前研究主要存在以下主要问题,在未来的研究中亟待加强。

目前对绿洲定义的理解不断深化和完善[1,15-18],对塔里木盆地绿洲沉积物的划分还没取得统一的认识,绿洲沉积阶段和绿洲演化阶段对应关系不明

确。究其原因，主要是盆地绿洲沉积指标体系还不完善，限制了进一步对绿洲沉积物和沉积阶段的划分和研究。Liu等[11]通过对盆地大范围不同类型地表沉积物的研究，建立了盆地衡量现代绿洲发育阶段的指标体系，认为粒度、土壤养分、淋溶系数等可以很好地甄别沙漠-绿洲沉积物和反映绿洲演化阶段。后续可将这一指标体系应用到绿洲沉积剖面地层中，对剖面中的绿洲沉积层位和绿洲演化阶段进行划分和研究。

年代学是绿洲演化过程的主要证据，塔里木盆地绿洲演化在时间上是否具有一致性，在空间上是否具有规律性还不清楚，主要原因是盆地绿洲沉积发育的年代框架还不完备。从梳理已发表文献来看，目前对绿洲沉积主要采用^{14}C测年，但由于适合^{14}C测年的材料只存在于绿洲发育的特定阶段，很难在整个绿洲沉积剖面中建立^{14}C年代序列[28-29,33]。OSL测年的主要材料为长石和石英矿物颗粒，在沙漠、绿洲沉积物中广泛存在，近年来OSL测年技术在干旱区环境演化过程研究中得到了广泛应用，显示出广阔的前景[10,44]。在未来研究中，应该对盆地大范围的不连续绿洲沉积进行OSL年代测试，结合考古遗址和^{14}C测年，进行集成研究，构建区域绿洲演化过程和年代框架。

过去，有研究者认为控制盆地绿洲发育的主要因素是山区降水或冰雪融水[53]，但造成盆地水文变化过程的究竟是山区降水还是冰雪融水目前还没有定论。由于盆地内部缺乏高分辨率的研究材料，未来应该对不同区域山区沉积记录加强研究，通过对比盆地内部绿洲演化与周边山区高分辨率的环境记录，能更好地认识区域绿洲演化和环境变化之间的关系，揭示影响盆地不同区域绿洲演化的机制。随着丝绸之路的开辟，人类活动对塔里木盆地绿洲演化过程产生了重大影响，尤其是历史时期大规模的屯垦和水利活动深刻地影响了盆地绿洲分布和演化过程[62]。另一方面，水文过程的改变和绿洲的兴衰又进一步影响了人类活动。因此，未来研究中应该结合历史文献或考古证据，进一步认识人类活动与绿洲演化的互馈机制。

4 结 论

通过对研究区已发表文献的梳理，目前对塔里木盆地绿洲的定义和主要类型的划分已比较完善，但是对盆地绿洲沉积物分类还不明确。末次冰盛期以来盆地绿洲在时空演化上存在着差异性，通过把绿洲、河湖相沉积发育年代数据进行概率密度分析，发现绿洲发育与盆地内部水文过程密切关联。把二者的发育概率密度与古里雅冰芯$\delta^{18}O$及区域湿度变化进行对比，发现在不同时段绿洲的发育受控于不同的因素，6 ka之前可能主要是高原与山区冰雪融水，6 ka之后可能主要是山地降水。通过对不同区域绿洲发育进行总结，发现不同区域绿洲发育既有一致性也有差异性；通过与不同古环境记录对比，发现各区域绿洲发育与古环境变化的关系比较复杂。在未来研究中，应该进一步完善盆地绿洲沉积序列指标辨别体系；结合多种测年手段对盆地不同区域大范围不连续绿洲沉积记录进行年代测试和集成，构建区域绿洲发育的年代框架。开展盆地周边山地环境记录研究，注重对考古资料和历史文献记录信息的挖掘，进一步辨析绿洲演化与环境变化、人类活动及丝绸之路变迁之间的关系。

参考文献(References)

[1] 陈曦, 罗格平. 干旱区绿洲生态研究及其进展[J]. 干旱区地理, 2008, 31(4): 487-495. [Chen Xi, Luo Geping. Researehes and progress of oasis ecology in arid areas[J]. Arid Land Geography, 2008, 31(4): 487-495.]

[2] 陈发虎, 董广辉, 陈建徽, 等. 亚洲中部干旱区气候变化与丝路文明变迁研究: 进展与问题[J]. 地球科学进展, 2019, 34(6): 561-572. [Chen Fahu, Dong Guanghui, Chen Jianhui, et al. Climate change and silk road civilization evolution in arid Central Asia: Progress and issues[J]. Advances in Earth Science, 2019, 34(6): 561-572.]

[3] Hansen V. The Silk Road: A new history[M]. Londun: Oxford University Press, 2012: 3-25.

[4] 穆桂金, 陈冬梅. 绿洲沉积特征及沉积模式[J]. 干旱区地理, 2005, 28(1): 1-5. [Mu Guijin, Chen Dongmei. Characteristics of oasis sedimentation and sendimentary model[J]. Arid Land Geography, 2005, 28(1): 1-5.]

[5] Zhao H, Sheng Y W, Zhang J W, et al. Oasis evolution processes and mechanisms in the lower reaches of Heihe River, Inner Mongolia, China since 1 ka ago[J]. The Holocene, 2015, 25(3): 445-453.

[6] 周晓兵, 陶冶, 吴林, 等. 塔克拉玛干沙漠南缘荒漠绿洲过渡带不同土地利用影响下土壤化学计量特征[J]. 生态学报, 2019, 39(3): 969-980. [Zhou Xiaobing, Tao Ye, Wu Lin, et al. Soil stoichiometry in different land-use categories in desert-oasis ecotones

of the southern Taklimakan Desert[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(3): 969–980.]

[7] 安成邦, 王伟, 段阜涛, 等. 亚洲中部干旱区丝绸之路沿线环境演化与东西方文化交流[J]. 地理学报, 2017, 72(5): 875–891. [An Chengbang, Wang Wei, Duan Futao, et al. Environmental changes and cultural exchange between east and west along the Silk Road in arid Central Asia[J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(5): 875–891.]

[8] 姚檀栋, 陈发虎, 崔鹏, 等. 从青藏高原到第三级和泛第三级[J]. 中国科学院院刊, 2017, 32(9): 924–931. [Yao Tandong, Chen Fahu, Cui Peng, et al. From Tibetan Plateau to Third Pole and Pan-Third Pole[J]. Bulletin of the Chinese Academy of Sciences, 2017, 32(9): 924–931.]

[9] 王涛. 干旱区绿洲化、荒漠化研究的进展与趋势[J]. 中国沙漠, 2009, 29(1): 1–9. [Wang Tao. Review and prospect of research on oasification and desertification in arid regions[J]. Journal of Desert Research, 2009, 29(1): 1–9.]

[10] 张峰, 夏倩倩, 迪丽拜尔·吐尔孙, 等. 克里雅河尾闾圆沙三角洲古河道剖面所记录全新世古绿洲环境变化[J]. 干旱区地理, 2021, 41(1): 178–187. [Zhang Feng, Xia Qianqian, Tuersun Dilibaier, et al. Holocene hydrology and environment changes in the Keriya River Delta in 13.8–2.3 ka in Taklimakan Desert: Inferred from the stratigraphy[J]. Arid Land Geography, 2021, 41(1): 178–187.]

[11] Liu B, Sun A J, Zhao H, et al. Physicochemical properties of surface sediments in the Taklimakan Desert, northwestern China, and their relationship with oasis-desert evolution[J]. Catena, 2022, 208: 105751, doi: 10.1016/j.catena.2021.105751.

[12] 穆桂金, 刘嘉麒. 绿洲演变及其调控因素初析[J]. 第四纪研究, 2000, 20(6): 539–547. [Mu Guijin, Liu Jiaqi. An analysis of the oasis evolution and its control factors[J]. Quaternary Sciences, 2000, 20(6): 539–547.]

[13] 刘嘉麒, 秦小光. 塔里木盆地的环境格局与绿洲演化[J]. 第四纪研究, 2005, 25(5): 533–539. [Liu Jiaqi, Qin Xiaoguang. Evolution of the environment framework and oasis in the Tarim Basin[J]. Quaternary Sciences, 2005, 25(5): 533–539.]

[14] 朱秉启, 于静洁, 秦晓光, 等. 新疆地区沙漠形成与演化的古环境证据[J]. 地理学报, 2013, 68(5): 661–679. [Zhu Bingqi, Yu Jingjie, Qin Xiaoguang, et al. Formation and evolution of sandy deserts in Xinjiang: The palaeo-environmental evidences[J]. Acta Geographica Sinica, 2013, 68(5): 661–679.]

[15] 高华君. 我国绿洲的分布与类型[J]. 干旱区地理, 1987, 10(4): 23–29. [Gao Huajun. The distribution and types of oases in China [J]. Arid Land Geography, 1987, 10(4): 23–29.]

[16] 张林源, 王乃昂, 施棋. 绿洲的发生类型及时空演变[J]. 干旱区资源与环境, 1995, 9(3): 32–43. [Zhang Linyuan, Wang Nai'ang, Shi Qi. On the oases genesis types and evolution in time and space [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 1995, 9(3): 32–43.]

[17] 贾宝全. 绿洲景观若干理论问题的探讨[J]. 干旱区地理, 1996, 19(3): 58–65. [Jia Baoquan. Approach to some theoretical problems on oasis landscape[J]. Arid Land Geography, 1996, 19(3): 58–65.]

[18] 罗格平, 陈曦, 周可法, 等. 三工河流域绿洲时空变异及其稳定性研究[J]. 中国科学 (D辑), 2002, 32(6): 521–528. [Luo Geping, Chen Xi, Zhou Kefa, et al. Spatial-temporal variability and stability of oasis in Sangong River Basin[J]. Science in China (Series D), 2002, 32(6): 521–528.]

[19] Zu R P, Gao Q Z, Qu J J, et al. Environmental changes of oases at southern margin of Tarim Basin, China[J]. Environmental Geology, 2003, 44: 639–644.

[20] 樊自立. 塔里木盆地绿洲形成与演变[J]. 地理学报, 1993, 48(5): 421–427. [Fan Zili. A study on the formation and evolution of oases in Tarim Basin[J]. Acta Geographica Sinica, 1993, 48(5): 421–427.]

[21] 张林源, 王乃昂. 中国的沙漠和绿洲[M]. 兰州: 甘肃教育出版社, 1994: 147. [Zhang Linyuan, Wang Nai'ang. Deserts and oases in China[M]. Lanzhou: Gansu Education Press, 1994: 147.]

[22] 钟巍, 熊黑钢, 塔西甫拉提·特依拜. 策勒绿洲与荒漠交错带达木沟剖面近4 ka来干湿波动记录[J]. 中国沙漠, 1998, 18(3): 205–209. [Zhong Wei, Xiong Heigang, Teybai Tashplati. The dry-wet variation since about 4 ka B.P. revealed by Damugou section located at Cele oasis-desert transitional belt[J]. Journal of Desert Research, 1998, 18(3): 205–209.]

[23] 李保生, 董光荣, 祝一志, 等. 末次冰期以来塔里木盆地沙漠、黄土的沉积环境与演化[J]. 中国科学(B辑), 1993, 23(6): 644–651. [Li Baosheng, Dong Guangrong, Zhu Yizhi, et al. The sedimentary environment and evolution of desert and loess of Tarim Basin since last glacial[J]. Science in China (Series B), 1993, 23 (6): 644–651.]

[24] Zhong W, Xue J B, Shu Q, et al. Climatic change during the last 4000 years in the southern Tarim Basin, Xinjiang, northwest China [J]. Journal of Quaternary, 2007, 22(7): 659–665.]

[25] 冯起, 王建民. 塔克拉玛干沙漠北部全新世环境演变(Ⅱ)[J]. 沉积学报, 1998, 16(2): 129–133. [Feng Qi, Wang Jianmin. An evolution of Holocene environment in the north of Taklimakan Desert [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1998, 16(2): 129–133.]

[26] 钟巍, 熊黑钢, 塔西甫拉提·特依拜. 策勒绿洲塔格勒剖面孢粉分析的初步结果[J]. 干旱区研究, 1998, 15(3): 14–18. [Zhong Wei, Xiong Heigang, Teybai Tashplati. The preliminary study on the spore-pollen combination of the Tagele section in Cele oasis[J]. Arid Zone Research, 1998, 15(3): 14–18.]

[27] 文启忠, 乔玉楼. 新疆地区13000年来的气候序列初探[J]. 第四纪研究, 1990, 10(4): 363–371. [Wen Qizhong, Qiao Yulou. Preliminary probe of climatic sequence in the last 13000 years in Xinjiang region[J]. Quaternary Sciences, 1990, 10(4): 363–371.]

[28] Li B S, David Z D, Zhou X J, et al. Study of sediments in the Yutian-Hotan oasis, south Xinjiang, China[J]. Acta Geologica Sinica, 2002, 76(2): 221–228.

[29] Shu P X, Li B S, Wang H, et al. Abrupt environmental changes during the last 30 kyr in the southern margin of the Taklimakan Desert, a record from an oasis[J]. Quaternary Science Reviews, 2018, 201: 29–43.

[30] 钟巍, 熊黑钢. 近12 ka B.P.以来南疆博斯腾湖气候环境演化[J]. 干旱区资源与环境, 1998, 12(3): 28–35. [Zhong Wei, Xiong Heigang. Preliminary study on paleoclimatic evolution since about 12 ka B.P. in Bosten Lake, southern Xinjiang, China[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 1998, 12(3): 28–35.]

[31] 靳鹤龄, 董光荣, 金炯, 等. 塔克拉玛干沙漠腹地晚冰期以来的环境与气候变化[J]. 中国沙漠, 1994, 14(3): 31–37. [Jin Heling, Dong Guangrong, Jin Jong, et al. Environmental and climatic changes in the interior of Taklimakan Desert since late glacial age[J]. Journal of Desert Research, 1994, 14(3): 31–37.]

[32] Yang X P. The oases along the Keriya River in the Taklamakan Desert, China, and their evolution since the end of the last glaciation[J]. Environmental Geology, 2001, 41: 314–320.

[33] 张峰, 王涛, 海米提·依米提, 等. 2.7~1.6 ka B.P.塔克拉玛干沙漠腹地克里雅河尾闾绿洲的变迁[J]. 中国科学: 地球科学, 2011, 41(10): 1495–1504. [Zhang Feng, Wang Tao, Yimit Hamid, et al. Hydrological changes and settlement migrations in the Keriya River delta in central Tarim Basin ca. 2.7–1.6 ka B.P.[J]. Science China: Earth Science, 2011, 41(10): 1495–1504.]

[34] 秦作栋, 冯起. 塔克拉玛干沙漠北部平原区全新世沉积与气候变化的关系——以肖塘剖面为例[J]. 沉积学报, 1997(1): 168–171. [Qin Zuodong, Feng Qi. Relationship between Holocene sediment and climatic change in the plain area of northern Taklimakan Desert: Take Xiaotang section as example[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1997(1): 168–171.]

[35] Lü H Y, Chen X X, Liu J Q, et al. A preliminary study of chronology for a newly-discovered ancient city and five archaeological sites in Lop Nor, China[J]. Chinese Science Bulletin, 2010, 55(1): 63–71.

[36] Zhang J F, Liu C L, Wu X H, et al. Optically stimulated luminescence and radiocarbon dating of sediments from Lop Nur (Lop Nor), China[J]. Quaternary Geochronology, 2012, 10: 150–155.

[37] 钟骏平, 马黎春, 李保国, 等. 再论罗布泊“大耳朵”地区的干涸时间[J]. 干旱区地理, 2008, 31(1): 10–16. [Zhong Junping, Ma Lichun, Li Baoguo, et al. Rediscussion on the latest drying up of the “Great Ear” in the Lop Nor area[J]. Arid Land Geography, 2008, 31(1): 10–16.]

[38] 华玉山, 蒋平安, 武红旗. 罗布泊“大耳朵”地区L07–10剖面沉积特征及其环境指示意义[J]. 新疆农业大学学报, 2009, 32(1): 36–39. [Hua Yushan, Jiang Ping’an, Wu Hongqi. The sedimentary characteristics of L07–10 profile and its environmental indicator in Lop Nor “Great Ear” area[J]. Journal of Xinjiang Agricultural University, 2009, 32(1): 36–39.]

[39] Ma C M, Wang F B, Cao Q Y, et al. Climate and environment reconstruction during the Medieval Warm period in Lop Nur of Xinjiang, China[J]. Chinese Science Bulletin, 2008, 19: 3016–3027.

[40] 刘成林, 焦鹏程, 陈永志, 等. 罗布泊盐湖晚更新世末期芒硝岩沉积及其古气候意义[J]. 地球学报, 2008, 29(4): 397–404. [Liu Chenglin, Jiao Pengcheng, Chen Yongzhi, et al. Late Pleistocene Mirabilite deposition in the Lop Nur saline lake, Xinjiang and its paleoclimate implications[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2008, 29(4): 397–404.]

[41] 周兴佳, 李保生, 朱峰, 等. 南疆克里雅河绿洲发育和演化过程研究[J]. 云南地理环境研究, 1996, 8(2): 44–57. [Zhou Xingjia, Li Baosheng, Zhu Feng, et al. The research on the development and evolution of the oasis of Keria River in the Tarim Basin of Xinjiang[J]. Yunnan Geographic Environment Research, 1996, 8(2): 44–57.]

[42] Yang X P, Frank P, Ulrich R. Late Quaternary environmental changes in the Taklamakan Desert, western China, inferred from OSL dated lacustrine and aeolian deposits[J]. Quaternary Science Reviews, 2006, 25: 923–932.

[43] Elisabeth G, Pierre G, Liang K Y. Radiocarbon ages of fluvial and lacustrine deposits in the Taklamakan Desert (southern Xinjiang, western China): Tectonic and climatic implications[J]. Surface Geosciences, 1995, 321: 215–221.

[44] 杨小平, 杜金花, 梁鹏, 等. 晚更新世以来塔克拉玛干沙漠中部地区的环境演变[J]. 科学通报, 2021, 66(24): 3205–3218. [Yang Xiaoping, Du Jinhua, Liang Peng, et al. Palaeoenvironmental changes in the central part of the Taklamakan Desert, northwestern China since the Late Pleistocene[J]. Chinese Science Bulletin, 2021, 66(24): 3205–3218.]

[45] Qin X G, Liu J Q, Jia H J, et al. New evidence of agricultural activity and environmental change associated with the ancient Loulan kingdom, China, around 1500 years ago[J]. The Holocene, 2011, 22(1): 53–61.

[46] Venkatesan T R, Ramesh R. Consideration of analytical uncertainties while plotting histograms[J]. Journal of Geological Society of India, 1993, 41: 313–317.

[47] Zeng L, Yi S W, Lu H Y, et al. Response of dune mobility and pedogenesis to fluctuations in monsoon precipitation and human activity in the Hulunbuir dune field, northeastern China, since the last deglaciation[J]. Global and Planetary Change, 2018, 168: 1–14.

[48] Timpson A, Colledge S, Crema E, et al. Reconstructing regional population fluctuations in the European Neolithic using radiocarbon dates: A new case-study using an improved method[J]. Journal of Archaeological Science, 2014, 52: 549–557.

[49] Thompson L G, Yao T D, Davis M E, et al. Tropical climate instability: The last glacial cycle from a Qinghai-Tibetan ice core[J]. Science, 1997, 276: 1821–1825.

[50] Chen F H, Jia J, Chen J H, et al. A persistent Holocene wetting trend in arid Central Asia, with wettest conditions in the Late Holocene, revealed by multi-proxy analyses of loess-paleosol sequences in Xinjiang, China[J]. Quaternary Sciences Review, 2016, 146: 134–146.

[51] Chen F H, Chen J H, Jonathan H, et al. Moisture changes over the last millennium in arid Central Asia: A review, synthesis and comparison with monsoon region[J]. Quaternary Science Reviews, 2010, 29: 1055–1068.

[52] Chen F H, Chen J H, Huang W, et al. Westerlies Asia and monsoonal Asia: Spatiotemporal differences in climate change and possible mechanisms on decadal to sub-orbital time scales[J]. Earth Science Reviews, 2019, 192: 337–354.

[53] Li Y, Hu L, Wang H, et al. Meltwater-driven water-level fluctuations of Bosten Lake in arid China over the past 2000 years[J]. Geophysical Research Letters, 2021, 48(2): 48, doi: 10.1029/2020gl090988.

[54] Liu J, Wang R J, Zhao Y, et al. A 40000-year record of aridity and dust activity at Lop Nur, Tarim Basin, northwestern China[J]. Quaternary Science Reviews, 2019, 211: 208–211.

[55] Zhao J J, An C B, Huang Y S, et al. Contrasting early Holocene temperature variations between monsoonal East Asia and westerly dominated Central Asia[J]. Quaternary Science Reviews, 2017, 178: 14–23.

[56] Liu C L, Zhang J F, Jiao P C, et al. The Holocene history of Lop Nur and its palaeoclimate implications[J]. Quaternary Science Reviews, 2016, 148: 163–175.

[57] Li C G, Wang M D, Liu W G, et al. Quantitative estimates of Holocene glacier meltwater variations on the western Tibetan Plateau [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2021, 559: 116766, doi: 10.1016/j.epsl.2021.116766.

[58] 董广辉, 芦永秀, 刘培伦, 等. 6000–2000 a B.P. 丝绸之路国内段人类活动的时空格局与影响因素研究[J]. 第四纪研究, 2022, 42(1): 1–16. [Dong Guanghui, Lu Yongxiu, Liu Peilun, et al. Spatio-temporal pattern of human activities and their influencing factors along the ancient Silk Road in northwest China from 6000 a B.P. to 2000 a B.P.[J]. Quaternary Sciences, 2022, 42(1): 1–16.]

[59] 张峰, 王姣, 王金花, 等. 克里雅河尾闾遗址群序列: 考察回顾与年代研究综述[J]. 新疆大学学报, 2021, 38(2): 204–212. [Zhang Feng, Wang Jiao, Wang Jinhua, et al. A review of investigation and excavation of oasis relics from the lower reaches of the Keriya River[J]. Journal of Xinjiang University, 2021, 38(2): 204–212.]

[60] Xie H C, Liang J, Richard S, et al. Changes in the hydrodynamic intensity of Bosten Lake and its impact on early human settlement in the northeastern Tarim Basin, arid Central Asia[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2021, 576: 110499, doi: 10.1016/j.palaeo.2021.110499.

[61] 林梅村. 大月氏的原始故乡–兼论西域三十六国之形成[J]. 西域研究, 2013(2): 90–104. [Lin Meicun. On the original hometown of the Greater Youzhi People[J]. The Western Regions Studies, 2013 (2): 90–104.]

[62] 樊自立, 艾里西尔, 王亚俊, 等. 新疆人工灌溉绿洲的形成和发展演变[J]. 干旱区研究, 2006, 23(3): 410–418. [Fan Zili, Aili Xier, Wang Yajun, et al. Formation, development and evolution of the artificially-irrigated oases in Xinjiang[J]. Arid Zone Research, 2006, 23(3): 410–418.]

Oases evolution in Tarim Basin since the Last Glacial Maximum: Progress and issues

SUN Aijun[1,2,3], ZHAO Hui[2], LIU Bing[2], WANG Keqi[2,3], CHAO Qian[2,3], SHI Zhilin[4], CHEN Fahu[1,5,6]

(1. Key Laboratory of Western China's Environmental Systems (Ministry of Education), College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, Gansu, China; 2. Key Laboratory of Desert and Desertification, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, Gansu, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. Institute of Dunhuang Studies of Lanzhou University, Lanzhou 730000, Gansu, China; 5. State Key Laboratory of Tibetan Plateau Earth System, Resources and Environment, Institute of Tibetan Plateau Research, CAS, Beijing 100101, China; 6. Alpine Paleoecology and Human Adaptation Group (ALPHA), Institute of Tibetan Plateau Research, CAS, Beijing 100101, China)

Abstract: Oases around the Tarim Basin (TB), northwestern China, as key stations of the "Silk Road" in the historic time and the modern Silk Road Economic Belt, have been critical areas for human production and living since ancient times. It is crucial to investigate the process and mechanism of the evolution of these oases in the TB to explore the relationship between oasis evolution and human activities. However, because of human activities and complex environmental changes, the oasis deposit sequences in the TB are fragmental and discontinuous. Thus, it is necessary to systematically integrate profiles with oasis sediments to explore the completed oasis evolution process in the TB. In this study, we reviewed previous studies on oases in the TB and summarized the definitions of oasis and oasis deposits using the index system to better clarify these sediments. Twenty-four publications on oasis and fluvial-lacustrine deposit sections in the basin since 28 ka were selected, including 232 oasis and 120 fluvial-lacustrine deposit dating results. We used the probability density function (PDF) to analyze oasis and fluvial-lacustrine deposit development dates. The results show that there is a good temporal consistency between the two deposits in the entire basin, suggesting that the development of oases is closely related to hydrologic processes in the TB. Then, the PDF of oasis and fluvial-lacustrine deposits were compared with the temperature record from the Guliya ice core and humidity records from loess-paleosol sequences around the TB. The development of oasis and fluvial-lacustrine deposits are highly correlated with temperature changes before 6 ka and are associated with mountainous humidity after 6 ka. The results indicate that glacier meltwater is the main controlling factor of oasis development before 6 ka and that oasis flourishing after 6 ka is mainly due to mountain precipitation. Furthermore, comparing the PDF in different regions of the TB, oasis development is consistent in some periods and has regional differences. In the future, we should establish proxies representing the different stages of oasis development; large-scale sample collections and dating will be required to integrate the oasis evolution process in the TB region; the main control factors of oasis deposit evolution in different periods should be identified.

Key words: Last Glacial Maximum; oasis evolution; fluvial-lacustrine deposits; Tarim Basin